

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

همه امتیازهای این پایان نامه به دانشگاه بوعلی سینا همدان تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب پایان نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها، باید نام دانشگاه بوعلی سینا (یا استاد یا استادان راهنمای پایان نامه) و نام دانشجو با ذکر مآخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.



دانشگاه تبریز
دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه:

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک حالت جامد

عنوان:

آشکارسازی توسط CCD و کاربردهای آن

استاد راهنما:

دکتر عبدالحسین خدام محمدی

استاد مشاور:

دکتر محمد حسین توکلی

پژوهشگر:

سارا نجمزاده

اردیبهشت ۸۹



دانشگاه گیلان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک
گرایش حالت جامد

عنوان:

آشکارسازی توسط CCD و کاربردهای آن

استاد راهنما:

دکتر عبدالحسین خدام محمدی

پژوهشگر:

سارا نجم زاده

کمیته ارزیابی پایان نامه

- ۱- استاد راهنما: دکتر عبدالحسین خدام محمدی..... استادیار فیزیک
- ۲- استاد مشاور: دکتر محمد حسین توکلی..... استادیار فیزیک
- ۳- استاد مدعو: دکتر مهدی حاجی ولیئی..... استادیار فیزیک
- ۴- استاد مدعو: دکتر محمد ملک جانی..... استادیار فیزیک



دانشگاه بوعلی سینا

دانشکده علوم

گروه فیزیک

جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

سارا نجم زاده در رشته فیزیک (گرایش حالت جامد)

تحت عنوان:

آشکارسازی توسط CCD و کاربردهای آن

به ارزش ۶ واحد در روز چهارشنبه مورخ ۱۳۸۹/۲/۱ ساعت ۱۶-۱۴ در محل آمفی تئاتر ۱ و با

حضور اعضای هیأت داوران زیر برگزار گردید و با نمرهدرجه.....ارزیابی شد

ترکیب اعضای هیأت داوران:

ردیف	سمت در هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ علمی - گروه/ دانشکده/ دانشگاه	محل امضاء
۱.	استاد راهنما	دکتر عبدالحسین خدام محمدی	استادیار-فیزیک/علوم/ بوعلی سینا	
۲.	استاد مشاور	دکتر محمد حسین توکلی	استادیار فیزیک/علوم/بوعلی سینا	
۳.	استاد مدعو	دکتر مهدی حاجی ولیئی	استادیار-فیزیک/علوم/ بوعلی سینا	
۴.	استاد مدعو	دکتر محمد ملک جانی	استادیار-فیزیک/علوم/ بوعلی سینا	

سپاسگزاری:

سپاس خدایی را که زیباییهای آفرینش را برای ما برگزید و روزی‌های پاکیزه را بر ما روان ساخت و ما را به تسلط بر همه آفریدگان برتری داد، و از این جهت همه مخلوقاتش ما را به قدرت او فرمانبردار و به نیرویش از اطاعت ما ناچارند.

الهی، تو را سپاس بر آنکه ما را از بلا نگاه داشتی، و تو را شکر بر آن نعمت‌ها که به ما عطا کردی، چنان سپاسی که سپاس سپاسگزاران را پشت سر گذارد، و چنان سپاسی که آسمان و زمین خدا را پر سازد، زیرا که تویی منعم مواهب جسیم، و بخشایشگر نعمت‌های عظیم، و پذیرنده سپاس مختصر، و پاداش دهنده شکر کم و نیکو کار خوش‌رفتار، و صاحب نعمت.

از پدر و مادر مهربانم که سال‌ها با تلاش بی‌شائبه و بدون هیچ‌گونه چشم‌داشت، امکان تحصیل با فراغ‌بال را برایم فراهم نمودند صمیمانه سپاسگزارم.

وظیفه خود می‌دانم صمیمانه‌ترین سپاس‌ها و تشکرهایم را تقدیم کنم به استاد راهنمای ارجمند و گرامی ام جناب آقای دکتر عبدالحسین خدام محمدی، چرا که بدون صبر و حوصله و دلسوزی‌های بی‌دریغ و راهنمایی‌های سودمند ایشان انجام این تحقیق غیر ممکن بود.

از استاد گرانقدر آقای دکتر محمد حسین توکلی که مشاور اینجانب بودند نیز سپاسگزارم.

از همکلاسی‌ها و دوستان خوبم به‌خاطر همراهی همیشگی‌شان سپاسگزاری ویژه دارم.

در نهایت سپاس از هر یاری دهنده‌ای که وسعت همراهی‌اش حتی به قدر لحظه‌ای مرا به

سپاسی ابدی موظف نمود.

تقدیم به پدر و مادرم

که محبت آنها مفهوم بی دریغ عشق است.

وجودشان سایه ایست بر فراز سربلندی های من

و تکیه گاهی است استوار در لحظه لحظه زندگیم



دانشگاه بوعلی سینا
مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی

عنوان: آشکارسازی توسط CCD و کاربردهای آن

نام نویسنده: سارا نجمزاده

نام استاد راهنما: دکتر عبدالحسین خدام محمدی

نام استاد مشاور: محمد حسین توکلی

دانشکده : علوم گروه آموزشی: فیزیک

رشته تحصیلی: فیزیک گرایش تحصیلی: حالت جامد مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد

تاریخ تصویب: ۱۳۸۷/۷/۱ تاریخ دفاع: ۱۳۸۹/۲/۱ تعداد صفحات: ۹۳

چکیده:

آشکارسازهای CCD به عنوان یکی از قطعات اساسی در تصویربرداری، اسپکتروسکوپی، تلسکوپ‌های نجومی، فلوروسکوپی و غیره هستند. در اخترفیزیک تکنیک نجوم اشعه ایکس با دوربین‌های CCD از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از پارامترهای مهم مورد بررسی در CCDها بازده کوانتومی آشکارسازی (DQE) است. محدوده عملکرد CCDها در ناحیه مرئی می‌باشد. می‌توان با قرار دادن پوشش‌های سینتیلاتوری بر روی این آشکارسازها محدوده عملکرد آنها را تا ناحیه اشعه ایکس بالا برد. در این تحقیق با استفاده از داده‌های تجربی، شبیه‌سازی مقادیر QE و DQE را برای هر انرژی در بازه (۲۰-۰/۱ keV) که مناسب برای کاربردهای اخترفیزیکی است را به دست می‌آوریم. در این روش با داشتن مقادیر DQE در هر انرژی برای دو نوع CCD تابش از روبرو (fi) و تابش از پشت (bi)، می‌توان رفتار هر دو آشکارساز را با هم مقایسه کرد. اندازه‌گیری درصد انحراف میانگین برای هر نوع CCD در انرژی‌هایی که داده‌های تجربی در دست بود (۵/۴ keV، ۸ و ۱۶)، نشان داد که شبیه‌سازی با دقت بالا انجام پذیرفته است.

واژه‌های کلیدی: آشکارساز CCD، بازده کوانتومی آشکارساز QE، بازده کوانتومی ابزاری DQE.

عنوان	فهرست مطالب	صفحه
۲-۲- بررسی ضریب جذب و عمق نفوذ در CCD	۳۳
۳-۲- واکنش طیفی	۳۵
۴-۲- بازده کوانتومی (QE)	۳۶
۵-۲- نایکنواختی واکنش پیکسل (PRNU)	۳۸
۶-۲- نایکنواختی سیگنال تاریک DSNU	۳۹
۷-۲- بازده تبدیل بار، CCE	۳۹
۱-۳- CCD و نور مرئی	۴۲
۲-۳- CCD و امواج مادون قرمز	۴۳
۱-۲-۳- طریقه کوپل کرن CCD و آشکارسازهای مادون قرمز	۴۵
۳-۳- CCD و پرتوهای ماورابنفش	۴۷
۱-۳-۳- یک نمونه CCD دارای حساسیت بین مادون قرمز و ماورابنفش	۴۸
۴-۳- CCD و اشعه ایکس	۴۹
۵-۳- اشعه گاما	۵۰
۱-۴- فوتولیتوگرافی	۵۲
۲-۴- اسپکتروسکوپی	۵۴
۳-۴- فلوروسکوپی	۵۶
۴-۴- دوربین‌های ترموگراف	۵۷
۵-۴- CCDهای اخترشناسی	۵۹
۱-۵-۴- نورسنجی با استفاده از CCD	۵۹
۲-۵-۴- زمان نوردهی	۶۰
۳-۵-۴- دوربین موزاییکی CCD	۶۰
۶-۴- آشکارسازها و تجهیزات اشعه ایکس	۶۰
۱-۶-۴- تجهیزات اشعه ایکس: رصدخانه اشعه ایکس چاندررا (CXO)	۶۱
۱-۵- نقش بازده کوانتومی در عملکرد یک آشکارساز جمع کننده	۶۶

عنوان	فهرست مطالب	صفحه
۱-۱-۵- بازده کوانتومی آشکارسازی	۶۷
۲-۱-۵- محاسبه واریانس در آمار دو جمله‌ای	۶۸
۳-۱-۵- آشکارساز تصویربردار واقعی	۶۹
۲-۵- طراحی آشکارسازهای اشعه ایکس	۷۰
۱-۲-۵- فرمولبندی DQE با در نظر گرفتن سینتیلاتور و تقویت کننده تصویر	۷۳
۲-۲-۵- محاسبات	۷۴
۳-۵- نتایج	۸۸

صفحه	فهرست ها	عنوان
۵	شکل (۱-۱) چاه پتانسیل در یک MOS در صورتی که ولتاژ گیت از ولتاژ زمین بیشتر باشد.....	
۸	شکل (۲-۱) نمایش نحوه انتقال بار در یک CCD سه فازه.....	
۱۰	شکل (۳-۱) نمایش عملکرد انتقال بار در CCD سه فازه و پالس‌های فرمان الکتریکی.....	
۱۳	شکل (۴-۱) نمایش عملکرد انتقال بار در دو نمونه از CCDهای دو فازه و پالس‌های فرمان الکتریکی آن‌ها.....	
۱۴	شکل (۵-۱) نمایش عملکرد انتقال بار در CCD دو فازه با استفاده از یک فاز کلاک.....	
۱۴	شکل (۶-۱) نمایش عملکرد انتقال بار در CCD چهار فازه و پالس‌های فرمان الکتریکی.....	
۱۵	شکل (۷-۱) نمایش ناخیه فعال و غیر فعال بر روی یک حسگر تصویری.....	
۱۶	شکل (۸-۱) نمایش آرایه قالبی (FT) و یک نمونه از این حسگر.....	
۱۷	شکل (۹-۱) نمایش آرایه قالبی کامل (FFT) و یک نمونه از این حسگر.....	
۱۸	شکل (۱۰-۱) نمایش آرایه قالبی بین خطی- قالبی (IT) و یک نمونه از این حسگر.....	
۱۹	شکل (۱۱-۱) نمایش آرایه انتقال بین خطی- قالبی (FIT) و یک نمونه از این حسگر.....	
۲۰	شکل (۱۲-۱) تراشه تحت تابش از روبرو.....	
۲۱	شکل (۱۳-۱) تراشه تحت تابش از پشت.....	
۲۲	شکل (۱۴-۱) نمایش ساختار CMOS.....	
۲۳	شکل (۱۵-۱) دو ساختار CCD و CMOS در خروجی.....	
۲۷	شکل (۱۶-۱) منحنی تغییرات جریان تاریک دما.....	
۲۹	شکل (۱۷-۱) نمایش چگونگی تشکیل زوج الکترون-حفره بر اثر امواج یونیزه کننده.....	
۳۳	شکل (۱-۲) تولید زوج الکترون-حفره در زیرلایه سیلیکون در اثر برخورد شار فوتون.....	
۳۴	شکل (۲-۲) ضریب جذب و عمق نفوذ سیلیکون در طیف طول موج‌های مرئی.....	
۳۸	شکل (۳-۲) نمودار QE خارجی برای دو نوع CCD تابش از پشت و جلو.....	
۴۰	شکل (۴-۲) ساختار خروجی انتشار با بازنشانی بار، برای اندازه‌گیری بسته بار انتقال داده شده توسط CCD.....	
۴۲	شکل (۱-۳) نمایش محدوده طیف مرئی.....	
۴۴	شکل (۲-۳) نمایش طیف طول موج‌های مادون قرمز.....	
۴۷	شکل (۳-۳) طیف اشعه ماورابنفش.....	

عنوان	فهرست ها	صفحه
شکل (۳-۴) نمودار بازده کوانتومی نسبت به طول موج در دمای اتاق	۴۸
شکل (۳-۵) یک نمونه CCD دارای حساسیت بین مادون قرمز و اشعه ایکس	۵۰
شکل (۴-۱) واکنش CCD نوع (fi)، قبل و بعد از قرار گرفتن پوشش فسفر بر روی آن در ناحیه UV	۵۴
شکل (۴-۲) مسیر نور در اسپکترومتر	۵۵
شکل (۴-۳) نمودار QE برای دستگاه اسپکترومتر UV با منبع لامپ هیدروژنی	۵۵
شکل (۴-۴) CCD مورد استفاده در فلوروسکوپی	۵۷
شکل (۴-۵) نمودار QE در سیستم هیبریدی در دوربین‌های ترموگراف	۵۸
شکل (۴-۶) طرحی از تلسکوپ اشعه ایکس چاندرا	۶۳
شکل (۴-۷) تصویر اشعه ایکس قنطورس A از CXO	۶۴
شکل (۵-۱) ساختار مواد سینتیلاتوری بر روی CCD	۷۲
شکل (۵-۲) نمودار تعداد متوسط الکترون‌ها بر حسب انرژی در CCD نوع (bi)	۷۶
شکل (۵-۳) نمودار تعداد متوسط الکترون‌ها بر حسب انرژی در CCD نوع (fi)	۷۷
شکل (۵-۴) نمودار واریانس نویز آشکارساز بر حسب انرژی در CCD نوع (fi)	۷۷
شکل (۵-۵) نمودار واریانس نویز آشکارساز بر حسب انرژی در CCD نوع (bi)	۷۸
شکل (۵-۶) نمودار QE بر حسب انرژی در حالت (bi)	۷۹
شکل (۵-۷) نمودار QE بر حسب انرژی در حالت (fi)	۸۰
شکل (۵-۸) نمودار DQE بر حسب انرژی در حالت (bi)	۸۱
شکل (۵-۹) نمودار DQE بر حسب انرژی در حالت (fi)	۸۱
شکل (۵-۱۰) DQE بر حسب \bar{S}_i در حالت (bi)	۸۲
شکل (۵-۱۱) DQE بر حسب \bar{S}_i در حالت (bi)	۸۳
شکل (۵-۱۲) مقایسه منحنی‌های DQE بر حسب \bar{S}_i در دو حالت (bi) (کم‌رنگ) و (fi)	۸۳
(پرننگ)	۸۳
شکل (۵-۱۳) منحنی‌های DQE در انرژی ۵/۴ کیلو الکترون ولت برای حالت (fi) بر حسب \bar{S}_i ها، (خط چین) مربوط به آزمایشات انجام شده و (خط پر) نمودار شبیه‌سازی شده	۸۵

۸۵	شکل (۱۴-۵) منحنی‌های DQE در انرژی ۵/۴ کیلو الکترون ولت برای حالت (b_i) بر حسب \bar{S}_i ها، (خط چین) مربوط به آزمایشات انجام شده و (خط پر) نمودار شبیه‌سازی شده	
۸۶	شکل (۱۵-۵) منحنی‌های DQE در انرژی ۸ کیلو الکترون ولت برای حالت (f_i) بر حسب \bar{S}_i ها، (خط چین) مربوط به آزمایشات انجام شده و (خط پر) نمودار شبیه‌سازی شده	
۸۶	شکل (۱۶-۵) منحنی‌های DQE در انرژی ۸ کیلو الکترون ولت برای حالت (b_i) بر حسب \bar{S}_i ها، (خط چین) مربوط به آزمایشات انجام شده و (خط پر) نمودار شبیه‌سازی شده	
۸۷	شکل (۱۷-۵) منحنی‌های DQE در انرژی ۱۶ کیلو الکترون ولت برای حالت (f_i) بر حسب \bar{S}_i ها، (خط چین) مربوط به آزمایشات انجام شده و (خط پر) نمودار شبیه‌سازی شده	
۸۷	شکل (۱۸-۵) منحنی‌های DQE در انرژی ۱۶ کیلو الکترون ولت برای حالت (b_i) بر حسب \bar{S}_i ها، (خط چین) مربوط به آزمایشات انجام شده و (خط پر) نمودار شبیه‌سازی شده	

صفحه	جدول‌ها	عنوان
۴۴	.....LWIR ,MWIR ,SWIR	جدول (۱-۳) بعضی از مشخصات سه ناحیه
۷۵	..... نوع (b _i)	جدول (۱-۵) مقادیر به‌دست آمده در CCD
۷۵	..... نوع (f _i)	جدول (۲-۵) مقادیر به‌دست آمده در CCD
۷۹	.....	جدول (۳-۵) QE در حالت (b _i)
۷۹	.....	جدول (۴-۵) QE در حالت (f _i)

دستگاه جفت کننده بار (CCD)¹ یک حسگر تصویربردار است که از یک مدار یکپارچه تشکیل شده و شامل آرایه‌ای از خازن‌های حساس به امواج الکترومغناطیس می‌باشد.

ساختار اولیه CCD در سال ۱۹۶۹ توسط بویل و اسمیت از آزمایشگاه‌های بل پیشنهاد شد. این ساختار متشکل از یک سری الکتروود فلزی به صورت آرایه‌ای از نه خازن حساس به امواج الکترومغناطیس بود، که در یک سطر به یکدیگر متصل شده بودند.

اساس کار CCD، ذخیره و پس‌گیری بار به شکل دینامیکی در رشته‌ای از خازن‌های MOS² (در این قطعه از سیلیسیوم به عنوان نیم رسانا، اکسید سیلیسیوم به عنوان عایق و آلومینیوم برای الکتروود گیت استفاده می‌شود. به این علت به MOS معروف هستند) است. یک خازن MOS روی بستری از نیمه رسانای نوع P قرار می‌گیرد، و به آن یک پالس مثبت و بزرگ وارد می‌شود. یک پتانسیل در زیر الکتروود گیت بوجود می‌آید. در حقیقت پتانسیل سطحی یک چاه پتانسیل را تشکیل می‌دهد که می‌تواند برای ذخیره بار به کار می‌رود. عامل ایجاد بارهای الکترونیکی برخورد امواج الکترومغناطیس بر سطح CCD است که زوج حامل‌های بار را تولید می‌کند.

آنچه در این روند مورد نیاز است، روش ساده برای عبور سریع و بدون اتلاف بار از یک چاه پتانسیل به چاه مجاور می‌باشد. در این صورت می‌توان بسته‌های بار را به شکل دینامیکی منتقل و جمع‌آوری کرد تا بدین وسیله عملیات مختلف الکترونیکی را انجام دهند. در فصل اول به چگونگی عملکرد این آشکارساز پرداخته و انواع مختلف آن و عوامل مؤثر در ایجاد نویز را بررسی می‌کنیم.

CCDها کاربردهای وسیعی در حوزه‌های بیولوژی (تصویربرداری فلورسانسی پزشکی)، حسگرها و اسپکتروسکوپی UV و غیره دارند بخصوص بشکل خیلی گسترده در زمینه نجوم و اختر فیزیک بکار برده می‌شوند.

1 Charge Coupled Device

2 Metallic Oxide Semiconductor

از مشخصه‌های مهم دستگاه‌های حساس به نور همچون CCD، بازده کوانتومی می باشد. QE^1 به درصدی از فوتون‌های ورودی که در تشکیل سیگنال خروجی سهیم هستند، گفته می‌شود. در سال ۱۹۸۳، تلسکوپ‌ها به دوربین CCD مجهز شدند و هم اکنون تصاویر شگفت انگیزی از دوربین‌های CCD از تلسکوپ‌های فضایی مشاهده می‌شود.

ستاره شناسی اشعه ایکس شاخه‌ای از مشاهدات اخترفیزیکی است که به مطالعه منابع اشعه ایکس از اجرام آسمانی می‌پردازد.

حسگرهای CCD، در ناحیه مرئی (۴۰۰-۷۰۰ نانومتر) کارایی و بازدهی بسیار بالایی دارند. بنابراین ناحیه عملکرد CCDها عمدتاً در محدوده نور مرئی است، به طوری که با کاهش طول موج، بازده کوانتومی آن به شدت افت می‌کند.

امروزه نیاز به تصویربرداری در طول موج‌های کوتاه (UV, X-ray) افزایش یافته است. تکنیک‌هایی جهت توسعه CCDها به نواحی ماوراء بنفش (UV) و یا پرتو ایکس استفاده شده که از آن جمله کاربرد موادی مانند سینتیلاتورها در بالای سطح CCD است.

از منابع پرتو ایکس که در فصل پایانی مورد بحث قرار می‌گیرد، کهکشان‌های با هسته فعال (AGN)² هستند که پرتوهایی در ناحیه ۰/۱ keV تا ۱۰ keV صادر می‌کنند.

کمیت مفید دیگری به نام بازده کوانتومی کل سیستم (DQE)³ تعریف می‌شود. فرمولبندی DQE به صورت تابعی از QE، سیگنال ورودی و کل نویزهای سیستم است. بر اساس طراحی‌های مختلف صورت گرفته بر روی CCD، مقادیر DQE برای محدوده‌های مختلف انرژی قابل بررسی و دستیابی است. در فصل پایانی سعی کردیم بر اساس داده‌های مراجع مختلف و تکنیک‌های برون‌یابی، مقادیر QE و DQE را برای طرح خاصی از CCD در محدوده‌های پرتو ایکس محاسبه کنیم.

1 Quantum Efficiency

2 Active Galactic Nucleus

3 Detective Quantum Efficiency

فصل اول:

شناخت CCD

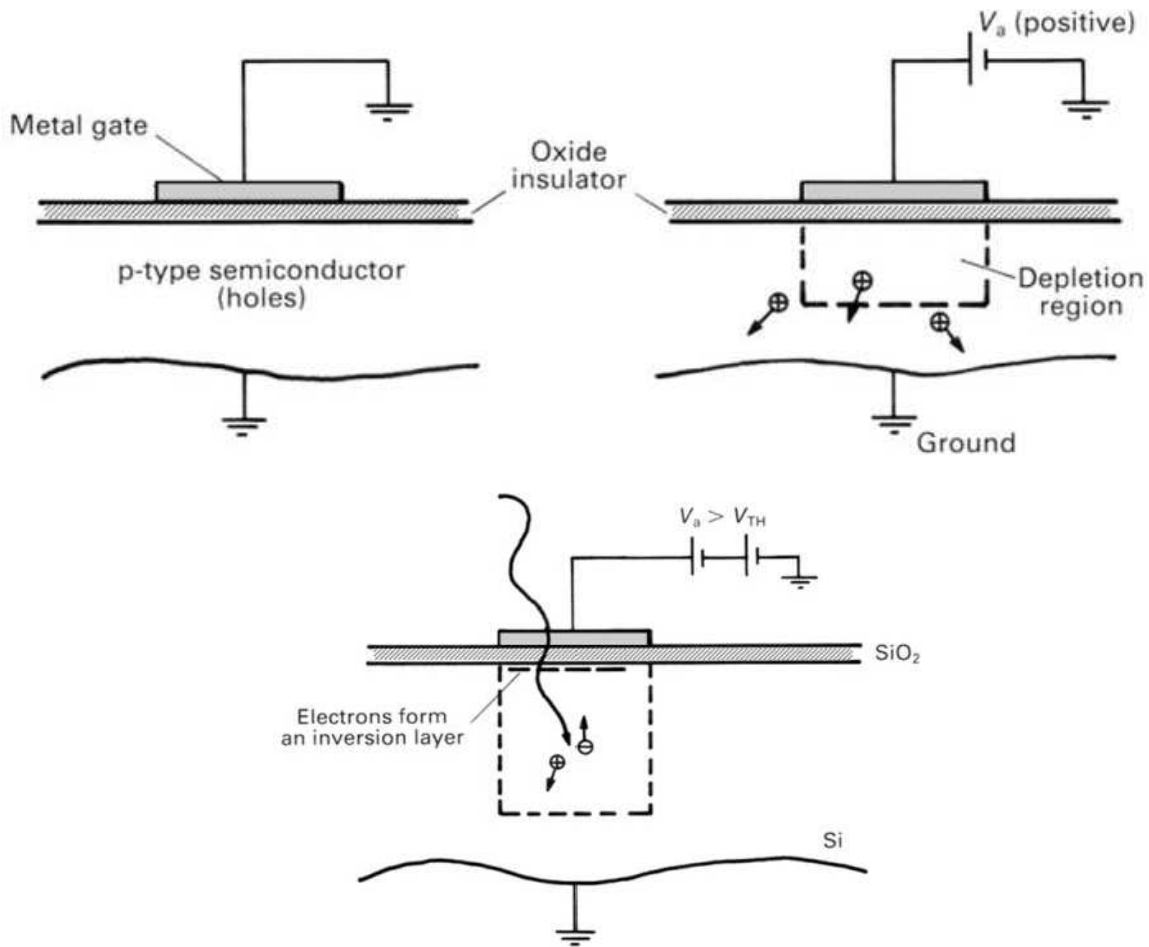
۱-۱- اساس کار CCD

۱-۱-۱- ذخیره بار

اساساً یک CCD از تعداد بی‌شماری عناصر تصویرگیرنده (پیکسل) نیمه‌رسانا تشکیل شده است. هر یک از این پیکسل‌ها، با جذب فوتون‌های تابشی سبب تولید زوج الکترون-حفره در داخل ماده نیمه‌رسانا می‌شوند. در صورت وجود یک میدان خارجی هر کدام از حامل‌های بار را می‌توان به یک سو هدایت کرد و در غیر این صورت عمل ترکیب الکترون-حفره انجام می‌شود. لذا برای این-که الکترون‌ها در داخل یک پیکسل محبوس شوند، به میدان الکتروستاتیکی نیاز است. این میدان اعمالی سبب جذب بارهای الکتریکی در منطقه خاصی می‌شود. به‌طور آشکار، ما به ناحیه‌ای جهت ذخیره بارها نیاز داریم تا تعداد زیادی از حامل‌ها در آنجا نگهداری شوند. این عمل با قرار گرفتن لایه‌ای از جنس دی‌اکسید سیلیکون با ضخامت (۱۰۰ نانومتر) که یک عایق الکتریکی است، در میان ساختار ماده نیمه‌رسانا و الکترودهای فلزی تحقق می‌یابد. این ساختار همانند خازن عمل می‌کند که قابلیت ذخیره کردن بارهای الکتریکی را دارد و MOS نامیده می‌شود. یک ولتاژ مثبت به گیت فلزی وارد می‌شود و میدان الکتریکی در داخل نیمه‌رسانا تولید می‌کند. اگر ماده نیمه‌رسانا از نوع p باشد، حامل‌های اکثریت تولید شده حفره‌ها هستند. با اعمال ولتاژ مثبت بر گیت ورودی، حفره‌ها به سمت پتانسیل کمتر رانده می‌شوند. بنابراین منطقه تهی که عاری از حامل‌های الکتریکی هست به وجود می‌آید. این شرایط در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. هنگامی که یک فوتون جذب می‌شود، در منطقه تهی تولید زوج الکترون-حفره می‌کند. حفره تحت میدان الکتریکی قرار می‌گیرد و به خارج از منطقه تخلیه رانده می‌شود. الکترون به سمت الکتروود مثبت‌تر جذب می‌شود. خازن MOS از دو خازن سری تشکیل شده است (خازن‌های اکسید C_{ox} و منطقه تهی C_{dep}) و ظرفیت کل از مجموع این دو به دست می‌آید. با تغییر ولتاژ اعمالی، عمق منطقه تهی و ظرفیت ذخیره سازی بار نیز تغییر می‌کند.

یک خازن P-MOS از لایه نشانی دی اکسید سیلیکون (عایق دی الکتریک) با ثابت حدود

۳/۹ میان گیت فلزی و نیمه رسانای نوع P (بور تزریق شده به سیلیکون) به وجود می آید.



شکل (۱-۱): چاه پتانسیل در یک MOS در صورتی که ولتاژ گیت از ولتاژ زمین بیشتر باشد [۳]

اگر d ضخامت لایه دی اکسید باشد، ظرفیت خازن دی اکسید در هر متر مربع، $C_{ox} = \frac{k\epsilon_0}{d}$

می باشد.

تغییرات ولتاژ (V) با عمق (X) با معادله پواسون بیان می شود:

$$\frac{d^2V}{dX^2} = \frac{\rho}{\epsilon_{si}} \quad (1-1)$$

گیت رسانا است و ولتاژ در آن ثابت می باشد. ولتاژ در سراسر لایه اکسید و منطقه تخلیه افت

می کند تا در $X = X_d$ به صفر برسد. مبدا در فصل مشترک Si-SiO₂ قرار می گیرد. بیشتر حامل-